

УДК 637.045

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.61.10.015](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.61.10.015)

Математическая модель оптимизации рецептуры многокомпонентных пищевых продуктов

А.В. Калач¹, Ю.В. Бугаев², Б.Е. Никитин³, И.А. Матыцина¹✉

¹*Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация*

²*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж,
Российская Федерация*

³*Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме. Одним из важных факторов при проектировании рецептуры новых пищевых продуктов является биологическая ценность белков, определяемая сбалансированностью аминокислотного состава. В ряде публикаций отмечено, что достижение требуемого уровня сбалансированности состава пищевых продуктов возможно только за счёт их многокомпонентности. В этом случае оптимизация заключается в подборе компонентов и определении их соотношений, обеспечивающих максимальное приближение массовых долей нутриентов к некоторому эталонному продукту, содержащему так называемый «идеальный белок». В связи с этим цель данной работы состоит в выработке на основе математического аппарата некоторого унифицированного подхода к проектированию рецептуры сбалансированных продуктов, в частности, в выборе универсального критерия сбалансированности аминокислотного состава. Авторами были сформулированы требования к искомому критерию оптимальности. Проанализированы три известных критерия оценки сбалансированности аминокислотного состава продуктов питания. Показано, что сформулированным требованиям в полной мере удовлетворяет коэффициент сбалансированности аминокислотного состава. На основе выбранного критерия построены математические модели оптимизации аминокислотного состава проектируемого многокомпонентного продукта, соответствующие различным целевым функциям при условии гарантированного уровня сбалансированности. На основе литературных данных об аминокислотном составе пищевых продуктов составлены иллюстрирующие примеры проектирования оптимального рецепта пищевой добавки при оптимизации по коэффициенту сбалансированности аминокислотного состава и индексу незаменимых аминокислот.

Ключевые слова: математическая модель, оптимизация, проектирование рецептур, сбалансированный аминокислотный состав, многокомпонентные пищевые продукты.

Для цитирования: Калач А.В., Бугаев Ю.В., Никитин Б.Е., Матыцина И.А. Математическая модель оптимизации рецептуры многокомпонентных пищевых продуктов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(10). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2628> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.015

A mathematical model for optimizing the formulation of multicomponent food products

A.V. Kalach¹, Yu.V. Bugaev², B.E. Nikitin³, I.A. Matytsina¹✉

¹*Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh,
the Russian Federation*

²*Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh,
the Russian Federation*

³*Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh,
the Russian Federation*

Abstract. One of the important factors in the design of new food products is the biological value of proteins, which is determined by the balance of amino acid composition. In a number of publications, it has been noted that the required level of balance in the composition of food products can only be achieved through their multi-component nature. In this case, optimization involves selecting components and determining their ratios to ensure that the mass fractions of nutrients are as close as possible to a reference product containing the so-called "ideal protein". In this regard, the purpose of this work is to develop, based on the mathematical apparatus, a unified approach to the design of balanced products, in particular, to choose a universal criterion for the balance of the amino acid composition. The authors formulated the requirements for the desired optimality criterion. Three well-known criteria for assessing the amino acid composition of food products have been analyzed. It has been shown that the amino acid composition balance coefficient fully meets the formulated requirements. Based on the selected criterion, mathematical models have been developed for optimizing the amino acid composition of a multi-component product, which correspond to various target functions and ensure a guaranteed level of amino acid composition balance. Based on the literature data on the amino acid composition of food products, illustrative examples of designing an optimal food additive recipe have been compiled by optimizing the amino acid composition balance coefficient and the index of essential amino acids.

Keywords: mathematical model, optimization, recipe design, balanced amino acid composition, multicomponent food products.

For citation: Kalach A.V., Bugaev Yu.V., Nikitin B.E., Matytsina I.A. A mathematical model for optimizing the formulation of multicomponent food products. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(10). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2628> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.61.10.015

Введение

При разработке рецептур новых пищевых продуктов важное значение имеет биологическая ценность белка, определяемая сбалансированностью аминокислотного состава. Организм человека может самостоятельно синтезировать всего 10 из 20 аминокислот (АК) – заменимые¹. В то время как остальные эссенциальные АК поступают в организм исключительно с пищей. Дефицит хотя бы одной незаменимой АК блокирует процессы синтеза белка, а также образование других биологически активных соединений. Поскольку в организме человека запаса аминокислот не существует, следовательно, их суточное поступление с рационом должно быть полностью компенсировано. Это необходимо для поддержания азотистого баланса [1].

Эмпирические данные отечественных и зарубежных исследователей подтверждают [2, 3], что достижение требуемой нутриентной сбалансированности продуктов питания возможно лишь при переходе к многокомпонентным рецептурам с активным применением вторичных продуктов и специализированных ингредиентов [4]. В такой модели задача оптимизации заключается в подборе компонентов и определении их соотношений с целью максимального соответствия фактического содержания нутриентов эталонным значениям [5].

Аминокислоты усваиваются организмом в определенной пропорции. Упрощённо, усвоенная часть аминокислот идёт непосредственно на синтез белка в организме, а оставшаяся часть – на прочие нужды, в частности, на восполнение энергии. Этот факт привел к появлению концепции идеального белка – условного понятия, обозначающего белок, который по сбалансированности аминокислотного состава наиболее полно отвечает потребностям организма человека [6]. Аминокислотный состав (профиль) этого белка, установленный на основе многолетних медико-биологических исследований,

¹ Feiner G. *Meat Products Handbook: Practical Science and Technology*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2006. 672 p.

предлагается Продовольственной и сельскохозяйственной организацией (ФАО) при ООН. Периодически этот профиль пересматривается с учетом обновляемых научных знаний. Содержание незаменимых аминокислот в 100 г эталонного белка по шкале ФАО/ВОЗ, утверждённой в 2011 году, приведено в Таблице 1, данные из источника [2].

Аминокислотный состав белка большинства используемых продуктов питания хорошо известен, следовательно, имеется достаточно данных для оптимизации рецептурного состава. Математическое моделирование широко используется для анализа белкового состава продуктов и составления оптимальных рецептов [7, 8]. Достигнутые результаты находят применение не только в пищевой промышленности, но и в животноводстве [9, 10] и медицине [11].

Таблица 1 – Аминокислотный состав «идеального белка» по шкале ФАО/ВОЗ
Table 1 – Amino acid composition of the "ideal protein" according to the FAO/WHO scale

Название аминокислоты	Рекомендации ФАО/ВОЗ 2011 г.
Валин	4
Изолейцин	3
Лейцин	6,1
Лизин	4,8
Метионин + цистеин	2,3
Фенилаланин + тирозин	4,1
Треонин	2,5
Триптофан	0,66
Гистидин	1,6

Недостатком проводимых исследований является разрозненность в подходах к построению моделей, подборе критериев и использовании методов оптимизации.

Цель работы – разработать унифицированный подход к проектированию рецептуры многокомпонентных пищевых продуктов с заданной степенью сбалансированности аминокислотного состава, базирующийся на выборе универсального критерия оптимальности и соответствующей математической модели, пригодной для встраивания в существующие алгоритмы и программные комплексы оптимизации рационов питания. Указанная цель достигается решением следующих задач.

1. Выбрать известный или разработать новый критерий оптимальности, значение которого адекватно отражало бы степень сбалансированности конечного продукта питания.
2. Построить математическую модель, реализация которой позволила бы получить рецепт многокомпонентного продукта с оптимальным значением предлагаемого критерия.
3. Разработать рекомендации по встраиванию созданной модели в известные алгоритмы и программные комплексы оптимизации рациона питания.

Материалы и методы

В настоящее время получил распространение целый комплекс математических зависимостей, отражающих оценки сбалансированности многокомпонентных пищевых продуктов. Приведём вид наиболее известных показателей.

1. Коэффициент рациональности [12] (коэффициент утилитарности аминокислотного состава [13]):

$$R_c = \frac{\sum_i AKC_i \cdot K_i}{\sum_i AKC_i}, \quad (1)$$

где AKC_i – аминокислотный скор i -й АК, рассчитанный по следующей формуле:

$$AKC_i = \frac{A_i^X}{A_i^{\mathfrak{A}}}, \quad (2)$$

где A_i^X – содержание i -й незаменимой АК в исследуемом продукте X , г/100 г белка; $A_i^{\mathfrak{A}}$ – содержание i -й незаменимой АК в эталоне (идеальном белке), г/100 г белка; K_i – коэффициент утилитарности i -й незаменимой АК, рассчитанный по следующей формуле:

$$K_i = \frac{\min AKC_j}{AKC_i}. \quad (3)$$

2. Коэффициент сбалансированности аминокислотного состава (КСАС) [2]:

$$U = AKC_{\min} \frac{\sum A_j^{\mathfrak{A}}}{\sum A_j^X}. \quad (4)$$

3. Параметр сбалансированности [14], вариант в [15]:

$$M = \sqrt{\sum_i (a_i - s_i)^2}, \quad (5)$$

где $a_i = \frac{A_i^X}{\sum A_j^X}$, $s_i = \frac{A_i^{\mathfrak{A}}}{\sum A_j^{\mathfrak{A}}}$ – относительная доля содержания i -й АК в исследуемом продукте X и в эталоне соответственно.

При выборе известного или разработке нового критерия будем руководствоваться следующими соображениями.

1. Согласно требованиям системного анализа и теории принятия решений [16], критерии определяют степень достижения цели и эффективность произведённых действий. Поэтому они должны формулироваться исходя из целей и подцелей проводимой работы.

2. Критерий должен быть всесторонним и измеримым, чтобы им смогло воспользоваться лицо, принимающее решение (ЛПР). По определению [17], критерий является всесторонним, если ЛПР, зная значение критерия в данной ситуации, полностью осознаёт, в какой степени достигается соответствующая цель. Критерий является измеримым, если он оказывается пригодным для количественного описания степени предпочтений ЛПР различных возможных значений критерия. Эти значения могут иметь числовое представления через целевую функцию, или хотя бы через их упорядочение по предпочтительности.

3. Наконец, критерий по возможности должен иметь ясную физическую интерпретацию, чтобы ЛПР смогло наглядно представить ценность той или иной альтернативы [18].

Будем исходить из очевидной цели – максимально снизить «бесполезную» трату дефицитных аминокислот на восполнение энергии и заставить их работать на синтез белка в человеческом организме.

Результаты

Обозначим

$$\xi = \frac{a_r}{s_r} = \min_i \frac{a_i}{s_i}, \quad (6)$$

где r – порядковый номер АК в изучаемом продукте или комплексе продуктов, для которой данный минимум достигается. Очевидно, значение ξ определяет коэффициент пропорциональности между АК-составом идеального белка и усвоенного белка продукта. Тогда относительное количество i -й АК, используемой по назначению, будет равно $\tilde{a}_i = \xi \cdot s_i$. Остальная часть $a_i - \tilde{a}_i$ пойдёт на выработку энергии. Общее относительное количество «сгоревшего» таким образом белка составит:

$$\delta = \sum_i (a_i - \tilde{a}_i) = \sum_i (a_i - \xi s_i) = \sum_i a_i - \xi \sum_i s_i. \quad (7)$$

Но $\sum_i a_i = \sum_i s_i = 1$, следовательно, $\delta = 1 - \xi$.

Итак, цели снижения доли теряемого белка соответствует критерий $1 - \xi$, который надо минимизировать, или, что то же самое, надо максимизировать ξ . Таким образом, ξ имеет наглядную физическую интерпретацию – это доля АК-состава потребляемого продукта, используемая непосредственно на синтез белка человеческого организма.

Покажем, что значение ξ совпадает с коэффициентом U сбалансированности аминокислотного состава КСАС [2]. Имеем:

$$\xi = \min_i \frac{a_i}{s_i} = \frac{a_r}{s_r} = \frac{A_r^X}{\sum A_j^X} \cdot \frac{\sum A_j^3}{A_r^3} = \frac{A_r^X}{A_r^3} \cdot \frac{\sum A_j^3}{\sum A_j^X} = AKC_{min} \frac{\sum A_j^3}{\sum A_j^X}. \quad (8)$$

Теперь покажем, что коэффициент $U = \xi$ является объективным показателем сбалансированности АК-состава продукта, другими словами, что он удовлетворяет требованию всесторонности. Пусть имеем абстрактный продукт X , для которого вычислено значение U . Тогда мера сбалансированности продукта соответствует степени близости к U отношений вида

$$d_i = \frac{a_i}{s_i} = \frac{A_i^X}{\sum A_j^X} \cdot \frac{\sum A_j^3}{A_i^3} \quad (9)$$

для всех i . Но $d_i \geq U$ для всех i . Значит, уменьшение содержания любой нелимитирующей k -й АК продукта должно улучшить сбалансированность, т. к. k -й компонент приблизится к минимальному значению A_{min}^X . Одновременно с этим уменьшится и сумма $\sum A_j^X$. Но поскольку A_{min}^X не изменилось, то значение отношения $\frac{A_{min}^X}{\sum A_j^X}$ возросло. Из формулы (8) имеем:

$$\xi = U = \min_i \frac{a_i}{s_i} = \frac{a_r}{s_r} = \frac{A_r^X}{\sum A_j^X} \cdot \frac{\sum A_j^3}{A_r^3} = \frac{A_{min}^X}{\sum A_j^X} \cdot \frac{\sum A_j^3}{A_r^3}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что при увеличении $\frac{A_{min}^X}{\sum A_j^X}$ значение U возрастает, т. к. величина $\frac{\sum A_j^3}{A_r^3}$ постоянна.

Аналогично, мера сбалансированности АК-состава возрастает при увеличении содержания в продукте лимитирующей АК, для которой $A_r^X = A_{min}^X$. Одновременно с этим возрастает и U .

Обсуждение

Итак, степень сбалансированности и значение U связаны монотонной зависимостью. Следовательно, $\xi = U$ можно считать объективным критерием сбалансированности, удовлетворяющим требованию всесторонности.

Хотя многочисленные исследования подтверждают, что все прочие перечисленные выше показатели определенным образом также характеризуют степень

сбалансированности АК-состава, тем не менее, возможны случаи, когда их показания противоречат значению U . Покажем это на примерах. Для простоты ограничимся пятью незаменимыми АК: изолейцин, валин, лейцин, лизин, метионин + цистеин, содержание которых в идеальном белке составляет (3; 4; 6,1; 4,8; 2,3), соответственно.

1. Коэффициент рациональности R_c . Пусть имеем два гипотетических продукта X и Y , белок которых содержит перечисленные АК в количествах (2,2; 2; 5; 3,4; 0,9) и (4; 4,6; 4,4; 4,8; 4,9), соответственно. Улучшение сбалансированности связано с увеличением R_c . Убеждаемся, что для продукта X $R_c = 0,621$, а для Y $R_c = 0,569$, т. е. по показателю R_c лучше продукт X . В то же время для продукта X $U = 0,586$, а для Y $U = 0,642$, т. е. по U лучше продукт Y .

2. Параметр сбалансированности M . Пусть белки продуктов X и Y содержат перечисленные АК в количествах (3,5; 4; 6,1; 8,5; 12) и (4,7; 6; 5,4; 5,4; 0,9). Улучшение сбалансированности связано с уменьшением M . Убеждаемся, что для продукта X $M = 0,284$, а для Y $M = 0,133$, т. е. по M лучше продукт Y . В то же время для продукта X $U = 0,592$, а для Y $U = 0,353$, т. е. по U лучше продукт X .

Ранее мы пришли к выводу, что U объективно отражает степень сбалансированности. Рассмотренные примеры показывают, что остальные критерии не всегда это отражают.

По значению ξ можно вычислить также абсолютную величину потерь в определённом количестве продукта. Пусть A_i^X – количество i -й АК в 100 г белка продукта, $\tilde{A}_i^X$ – количество усвоенной i -й АК. Тогда абсолютные потери равны $\Delta = \sum_i A_i^X - \sum_i \tilde{A}_i^X$. Величина $\tilde{a}_i = \xi \cdot s_i$ равна доли усвоенной i -й АК в продукте. Следовательно, $\tilde{A}_i^X = \tilde{a}_i \sum_j A_j^X$. Отсюда

$$\sum_i \tilde{A}_i^X = \sum_i (\tilde{a}_i \cdot \sum_j A_j^X) = \sum_i \xi s_i \cdot \sum_j A_j^X = \xi \cdot \sum_i A_i^X, \quad (11)$$

значит

$$\Delta = \sum_i A_i^X - \xi \sum_i A_i^X = (1 - \xi) \cdot \sum_i A_i^X. \quad (12)$$

Эта величина тоже может быть критерием сбалансированности. В этом случае эту величину надо минимизировать.

Покажем на примере, как можно использовать ξ в моделировании и оптимизации рациона. Пусть требуется из n продуктов (компонентов) составить композицию с максимально возможным приближением к идеальному белку. Обозначим $x_j, j = 1, \dots, n$ – количество j -го компонента в порции определенной массы конечного продукта, например, в 100 г. Пусть m_{ij} – содержание i -й незаменимой АК в 100 г j -го компонента. Поскольку в справочной литературе обычно указывается содержание определённой АК в 100 г белка продукта, значение вычислим по формуле:

$$m_{ij} = b_j A_{ij} / 100, \quad (13)$$

где b_j – количество общего белка, г/100 г j -го компонента, A_{ij} – количество i -й АК в белке j -го компонента, г/100 г.

Пусть s_i – относительная доля содержания i -й АК в идеальном белке. Тогда, по определению параметра ξ для любой i -й АК должно выполняться неравенство:

$$\frac{\sum_j m_{ij} x_j}{\sum_i \sum_j m_{ij} x_j} \geq \xi \cdot s_i. \quad (14)$$

Здесь в числителе дроби – количество i -й АК в 100 г конечного продукта, в знаменателе – суммарное количество незаменимых АК в 100 г продукта. Соответственно вся дробь

равна относительной доли i -й АК в 100 г конечного продукта. Приведя формулу (14) к общему знаменателю, получим систему неравенств:

$$\sum_j m_{ij} x_j \geq \xi \cdot s_i \sum_j x_j \sum_i m_{ij}, i = 1, \dots, k. \quad (15)$$

Поскольку выше было сказано, что рацион планируется в расчёте на порцию 100 г конечного продукта, то дополнительно надо потребовать выполнение равенства

$$\sum_j x_j = 1, \quad (16)$$

т. к. в данном случае 100 г выступает как единица массы.

Отсюда имеем оптимизационную задачу: найти значения $x_j \geq 0$ и ξ , при которых выполняются условия (15), (16), а ξ максимально. Решать её можно с использованием какого-либо пакета оптимизации, например, с помощью стандартной для Microsoft Excel надстройки «Поиск решения».

Систему (15), (16) можно также применить в качестве ограничений при решении задачи об оптимальном рационе с использованием какого-нибудь другого критерия, например, стоимости порции в 100 г. В этом случае значение ξ должно быть задано. Оно определяет гарантированную долю усваиваемых незаменимых АК в общем белке конечного продукта. Ценным свойством неравенств (15) при заданном ξ в такой ситуации будет их линейность, поскольку наиболее распространённым способом решения задачи об оптимальном рационе является сведение её к задаче линейного программирования.

Рассмотрим пример составления оптимального рецепта пищевой добавки. В качестве исходных компонентов выберем: 1) рапсовый жмых, 2) фасоль, 3) чечевица. АК-состав белка этих компонентов, согласно данным [4], приведен в Таблице 2, номера АК соответствуют Таблице 1.

Таблица 2 – Содержание общего белка и аминокислотный состав белков исходных компонентов, г/100 г

Table 2 – Total protein content and amino acid composition of the source components, g/100 g

Общий белок г/100 г	Аминокислотный состав белка компонент г/100 г								
	АК1	АК2	АК3	АК4	АК5	АК6	АК7	АК8	АК9
33	4,5	3,5	6,71	5,65	4,84	6,99	4,45	1,27	0
21	5,33	4,9	8,29	7,57	2,05	8,38	4,14	1,24	2,72
24	5,29	4,25	7,88	7,17	2,13	8,46	4,0	0,92	2,96

Вычислим значения по формуле (13) и сведем их в Таблицу 3.

Таблица 3 – Расчётное содержание незаменимых аминокислот в компонентах, г/100 г

Table 3 – Calculated content of essential amino acids in components, g/100 g

Количество АК в компонентах, г/100 г (m_{ij})								
АК1	АК2	АК3	АК4	АК5	АК6	АК7	АК8	АК9
1,4850	1,1550	2,2143	1,8645	1,5972	2,3067	1,4685	0,4191	0,0000
1,1193	1,0290	1,7409	1,5897	0,4305	1,7598	0,8694	0,2604	0,5712
1,2696	1,0200	1,8912	1,7208	0,5112	2,0304	0,9600	0,2208	0,7104

Составим и решим задачу максимизации ξ при ограничениях (15), (16). Ответ:

$$\xi = 0,86906, x_1 = 0,21935, x_2 = 0,40021, x_3 = 0,38044.$$

Таблица 4 – Относительные доли (a_i) содержания i -й АК в конечном продукте
Table 4 – Relative proportions (a_i) of the content of the i -th amino acid in the final product

Относительные доли (a_i) содержания i -й АК в конечном продукте								
АК1	АК2	АК3	АК4	АК5	АК6	АК7	АК8	АК9
0,8757	0,97855	0,86906	0,98709	0,86906	1,34791	1,15426	1,18311	0,86906

Из Таблицы 4 видно, что в конечном продукте лимитирующими являются три аминокислоты: АК3 – лейцин, АК5 – метионин + цистеин и АК9 – гистидин.

Коэффициент ξ можно также использовать при решении задач нелинейной оптимизации. Пусть, например, требуется из предыдущего набора продуктов составить рецепт сбалансированного многокомпонентного продукта с максимальным значением индекса незаменимых аминокислот (ИНАК) [3, 15], рассчитываемого по формуле:

$$\text{ИНАК} = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k \left(\frac{A_i^X}{A_i^9} \right)}, \quad (17)$$

где k – число незаменимых АК.

Составим целевую функцию. Имеем: $A_i^X = \frac{100 \sum_j m_{ij} x_j}{\sum_j b_j x_j}$. Формулу (17) удобно представить в логарифмической форме:

$$q = k \cdot \ln(\text{ИНАК}) = \sum_i (\ln(A_i^X) - \ln(A_i^9)). \quad (18)$$

Значение ξ положим равным 0,86. Решим задачу: найти максимум функции (18) при ограничениях (15), (16) и $x_j \geq 0, j = 1, \dots, n$. Получим решение:

$$x_1 = 0,21314, x_2 = 0,50978, x_3 = 0,27708, \text{ИНАК} = \exp\left(\frac{q}{k}\right) = 1,4592.$$

Соответствующий скор незаменимых АК приведён в Таблице 5.

Таблица 5 – Аминокислотный скор многокомпонентного продукта, полученного при максимизации ИНАК

Table 5 – Amino acid score of the multicomponent product obtained by maximizing the essential amino acid index (EAAI)

АКС многокомпонентного продукта								
АК1	АК2	АК3	АК4	АК5	АК6	АК7	АК8	АК9
1,270	1,440	1,266	1,439	1,251	1,951	1,676	1,760	1,251

Заключение

1. Показано, что КСАС является всесторонним и измеримым показателем, хорошо согласующимся с задачей минимизации доли нецелевого расхода аминокислот белка, и, следовательно, может служить универсальным критерием сбалансированности аминокислотного состава пищевых продуктов.

2. Разработана математическая модель, реализация которой позволит получить рецепт многокомпонентного продукта с оптимальным значением предлагаемого критерия.

3. Предложены рекомендации по использованию данного критерия при решении прочих задач оптимизации рациона питания, в частности при выборе другого критерия в качестве главного, при соблюдении требования гарантированного значения КСАС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Гараева С.Н., Редкозубова Г.В., Постолати Г.В. *Аминокислоты в живом организме*. Кишинев: Б. и.; 2009. 552 с.
2. Крухмалева М.В., Камербаев А.Ю. Оптимизация биологической ценности вторичных сырьевых ресурсов агропромышленного комплекса. *Вестник Инновационного Евразийского университета*. 2018;(3):64–68.
Krukhmaleva M.V., Kamerbayev A.Yu. Optimization of the biological value of secondary raw materials of the agro industrial complex. *Vestnik Innovatsionnogo Evraziiskogo universiteta*. 2018;(3):64–68. (In Russ.).
3. Окусханова Э.К., Асенова Б.К., Ребезов М.Б., Омаргалиева Н.К., Есимбеков Ж.С. Аминокислотный состав паштетов на основе мяса марала и белкового обогатителя. *Техника и технология пищевых производств*. 2015;(4):71–79.
Okuskhanova E.K., Asenova B.K., Rebezov M.B., Omargalieva N.K., Yesimbekov Zh.S. Aminoacid composition of pâté based on maral meat and protein enricher. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2015;(4):71–79. (In Russ.).
4. Зверев С.В., Зубцов В.А., Лобанов В.Г., Росляков Ю.Ф., Глухова Е.В. Льняной жмых в белковых пищевых добавках. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2020;(5-6):93–97. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.5-6.22>
Zverev S.V., Zubtsov V.A., Lobanov V.G., Roslyakov Yu.F., Glukhova E.V. Flaxseed cake in protein food additives. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*. 2020;(5-6):93–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2020.5-6.22>
5. Zverev S.V., Nikitina M.A. Balance of protein supplements according to the criterion of convertible protein. *Food Systems*. 2019;2(1):16–19. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2019-2-1-16-19>
6. Zverev S., Sesikashvili O., Pruidze E. Enrichment of protein barley and triticale groats by adding chickpea. *Journal of Food and Nutrition Research*. 2020;59(3):202–206.
7. Burlacu R. Mathematical model of optimization energy metabolism and protein quality to swine. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*. 2018;LXI(1):115–120.
8. Stein H. Evaluating protein quality of human foods using the pig as a model. *Journal of Animal Science*. 2016;94(suppl_2):20–21. <https://doi.org/10.2527/msasas2016-045>
9. Ouyang J., Huang N., Jiang Y. A single-model quality assessment method for poor quality protein structure. *BMC Bioinformatics*. 2020;21(1):157. <https://doi.org/10.1186/s12859-020-3499-5>
10. Wolfe R.R., Rutherfurd Sh.M., Kim I.-Y., Moughan P.J. Protein quality as determined by the Digestible Indispensable Amino Acid Score: Evaluation of factors underlying the calculation. *Nutrition Reviews*. 2016;74(9):584–599. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw022>
11. Liu Sh., Xie J., Fan Zh., Ma X., Yin Y. Effects of low protein diet with a balanced amino acid pattern on growth performance, meat quality and cecal microflora of finishing pigs. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023;103(2):957–967. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12245>
12. Shi Y., Song H., Liu J., Lin J., Fang L. Comprehensive evaluation of clinical application of balanced compound amino acid injection. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:880256. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.880256>
13. Zinina O., Merenkova S., Rebezov M., Tazeddinova D., Yessimbekov Z., Vietoris V. Optimization of cattle by-products amino acid composition formula. *Agronomy Research*. 2019;17(5):2127–2138. <https://doi.org/10.15159/AR.19.159>

14. Гордынец С.А., Чернявская Л.А., Яхновец Ж.А. Биологическая ценность яиц куриных пищевых, реализуемых на рынке Республики Беларусь. *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*. 2021;(15):246–256. <https://doi.org/10.47612/2220-8755-2020-15-246-256>
Gordynets S., Charniauskaya L., Yakhnovets J. Biological value of edible hen eggs sold on the market of the Republic of Belarus. *Topical Issues of Processing of Meat and Milk Raw Materials*. 2021;(15):246–256. (In Russ.). <https://doi.org/10.47612/2220-8755-2020-15-246-256>
15. Зверев С.В., Карпов В.И., Никитина М.А. Оптимизация пищевых композиций по профилю идеального белка. *Пищевые системы*. 2021;4(1):4–11. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-4-11>
Zverev S.V., Karpov V.I., Nikitina M.A. Optimization of food compositions according to the ideal protein profile. *Food Systems*. 2021;4(1):4–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-4-11>
16. Uziela K., Hurtado D.M., Shu N., Wallner B., Elofsson A. Improved protein model quality assessments by changing the target function. *Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics*. 2018;86(6):654–663. <https://doi.org/10.1002/prot.25492>
17. Кини Р.Л., Райфа Х. *Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения*. Москва: Радио и связь; 1981. 560 с.
Keeney R.L., Raiffa H. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Moscow: Radio i svyaz; 1981. 560 p. (In Russ.).
18. Дыкало Н.Я., Анисимов С.В., Лодыгин А.Д. и др. Парадигма сбалансированности пищевых систем. Сообщение первое. Критерии моделирования. *Современная наука и инновации*. 2019;(3):127–135.
Dykalo N.Ya., Anisimov S.V., Lodygin A.D., et al. The paradigm of food systems balanceness. Paper 1. Modelling criteria. *Modern Science and Innovations*. 2019;(3):127–135. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Калач Андрей Владимирович, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация
e-mail: a_kalach@mail.ru
ORCID: [0000-0002-8926-3151](https://orcid.org/0000-0002-8926-3151)

Andrey V. Kalach, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation.

Бугаев Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики, Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: y_bugaev52@mail.ru
ORCID: [0000-0002-1043-7682](https://orcid.org/0000-0002-1043-7682)

Yuri V. Bugaev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mathematics, Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, the Russian Federation.

Никитин Борис Егорович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий, моделирования и управления, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: nbe6419@gmail.com

ORCID: [0000-0002-6508-8723](https://orcid.org/0000-0002-6508-8723)

Boris E. Nikitin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technology, Modeling and Management, Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Матыцина Ирина Александровна, кандидат технических наук, профессор кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: irina210390@mail.ru

ORCID: [0000-0001-9236-9654](https://orcid.org/0000-0001-9236-9654)

Irina A. Matytsina, Candidate of Engineering Sciences, Professor at the Department of Information Security and Protection of Information Constituting a State Secret, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 31.08.2026; одобрена после рецензирования 20.10.2026; принята к публикации 27.10.2026.

The article was submitted 31.08.2026; approved after reviewing 20.10.2026; accepted for publication 27.10.2026.